

# 顺层岩质斜坡变形破坏模式临空条件研究

张婷婷, 周春清

(中国人民武装警察部队 水电第三总队, 四川 成都 610036)

**摘要:**建立了以软弱夹层为斜坡稳定性主要控制面且岩层面倾角与坡面角度一致、但临空条件不同的斜坡地质模型,提出了河谷底部有效岩体厚度  $d$  的概念,定量分析了不同变形破坏模式下的临空条件。

**关键词:**顺层岩质斜坡;临空条件;谷底有效岩体厚度;岩层层数

中图分类号:P642;TV221

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2015)04-0059-03

## 1 概述

层状边坡是自然界中比较常见的岩体结构,它是指有一组优势结构面十分发育且为岩层层面的斜坡。根据岩层面倾向与坡面倾向的关系,可以将层状斜坡分为水平层状岩质斜坡、顺倾向层状岩质斜坡、反倾向层状岩质斜坡<sup>[1]</sup>。不同类型的层状边坡发生的变形破坏模式有所不同:水平层状边坡主要以座落式剪切蠕变破坏为主,通常以后缘拉裂缝为主要标志<sup>[2]</sup>;缓倾顺层边坡则通常发生顺层面的剪切蠕变破坏,变形累计过程较漫长<sup>[3]</sup>;陡倾顺层边坡则会发生弯向坡外的弯曲-倾倒蠕变倾倒破坏<sup>[4]</sup>;而反倾层状边坡往往产生逆向剪切蠕变倾倒破坏<sup>[5]</sup>;对于复杂的层状结构则会产生相对复杂的组合失稳破坏模式<sup>[6]</sup>。然而,这些结论大都是一些定性的结论,而没有进一步量化。笔者建立了以软弱夹层为斜坡稳定性主要控制面的顺倾向层状岩质斜坡为研究对象,对其变形破坏模式进一步划分为顺层滑移、切层滑移、滑移-弯曲三种类型,并提出了河谷底部有效岩体厚度  $d$  的概念,定量分析了顺倾向层状岩质斜坡不同变形破坏模式下的临空条件。

## 2 顺倾向层状边坡不同临空条件地质模型

顺层岩质斜坡可以发生顺层滑移、切层滑移和滑移-弯曲三种典型变形破坏模式,在此基础上建立了如图1中所示的顺层岩质斜坡地质模型。根据河谷下切的程度,分析可能的变形破坏模式。若河谷下切至图1所示的位置①,即临空面完全切穿滑体并切穿软弱结构面;若滑体的下滑力大于抗滑力,则上部滑体将沿软弱面自由滑出;若河

谷下切至图1所示的位置②,若上部滑体的剩余下滑力能够切断坡脚处的谷底岩体,则会发生切层滑动;若河谷下切到图1所示的位置③,滑体虽然具有下滑的趋势,却不能够剪断谷底的岩体,但该力却能够引起岩体结构的失稳,从而发生滑移-弯曲。

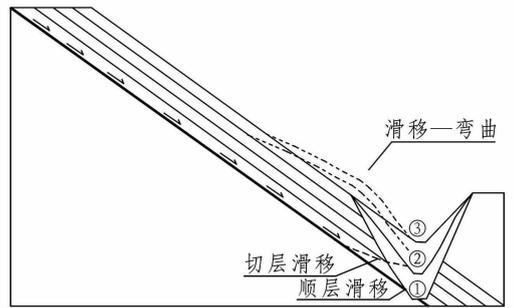


图1 不同临空条件下的顺层岩质斜坡示意图

### 2.1 顺层滑移的临空条件

由图1所示①可知,当斜坡前缘临空面切穿顺层岩体至软弱面(一般为滑面)时,且剩余下滑力大于零时,斜坡将会发生沿软弱面的顺层滑动。

设软弱面上部岩体总重为  $W$ ,岩层倾角为  $\alpha$ ,软弱夹层内摩擦角为  $\varphi$ ,粘聚力为  $c$ ,斜坡长为  $L$ ,通过刚体极限平衡力学分析可知,斜坡顺层滑移需要满足的力学条件为:

$$W \sin \alpha - (W \cos \alpha \tan \varphi + cL) > 0 \quad (1)$$

即斜坡前缘完全临空且滑移面(软弱带)暴露在临空面上。此时谷底的有效岩体厚度  $d=0$ 。

### 2.2 切层滑移的临空条件

由图1所示②可知,当软弱带(滑移面)未暴露在外,但斜坡前缘岩层较薄、不足以抵抗上部斜坡岩体的剩余下滑力,则可能发生切穿岩层的切

层滑移,对于此种情况,需在斜坡前缘切层处找一宽度为  $dx$  单元体进行受力分析(图2)。该单元体上表面无剪应力作用,故  $\sigma_x$  即为主应力  $\sigma_1$ ,且  $\sigma_3 = 0$ (图3)。根据最大剪应力理论:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1}{2} \geq [\tau] \quad (2)$$

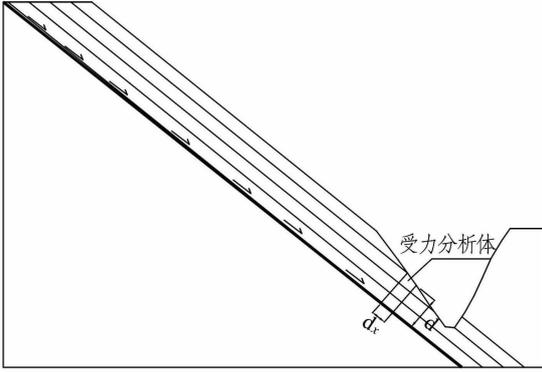


图2 切层滑移临空条件分析的单元体选取示意图

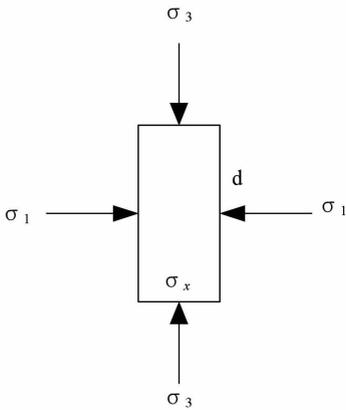


图3 切层滑移单元体受力分析示意图

仍按2.1中假设的已知条件,且设斜坡前缘谷底有效岩体厚度为  $d$ ,则有:

$$\frac{W \sin \alpha - (W \cos \alpha \tan \varphi + cL)}{2d} \geq [\tau] \quad (3)$$

进一步得到:

$$d \leq \frac{W \sin \alpha - (W \cos \alpha \tan \varphi + cL)}{2[\tau]} \quad (4)$$

当谷底有效岩体厚度小于、等于  $d$  时,在上部岩体的剩余下滑力作用下,滑体将剪断该处岩体产生切层滑动。

### 2.3 滑移-弯曲的临空条件

由图1所示③可知,当软弱带(滑移面)未暴露在外且斜坡前缘岩层较厚,斜坡后缘滑体的剩余下滑力虽然不能切穿此部分岩体,但能够导致

该部分岩层的弯曲,从而导致前缘岩体发生弯曲隆起。

假设滑移总长度为  $L$ ,滑移段长度为  $l_1$ ,弯曲岩体长度为  $l_2$ ,岩层层数为  $n$ ,岩层倾角为  $\beta$ ,内摩擦角为  $E_m$ ,粘聚力为  $c$ ,岩体容重为  $\gamma$ ,弹性模量为  $E_m$ ,则岩层弯曲的临界力  $F_{cr}$  可根据一端固定、一端铰支的压杆稳定欧拉公式计算:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E_m I}{(0.7l)^2} \quad (5)$$

式中  $I = \frac{1}{12} d^3$  为转动惯量; $d$  为抵抗岩体弯曲的谷底有效岩体厚度。但由于结构面的存在,转动惯量  $I$  需要折减,其折减系数的推导见另文。

此处将整个厚度上的岩层看作一个整体,对弯曲段发生弯曲时,只考虑其结构上失稳的力学条件,因此,不能将其自重作用考虑在内,否则不能采用欧拉公式。其力学模型见图4。

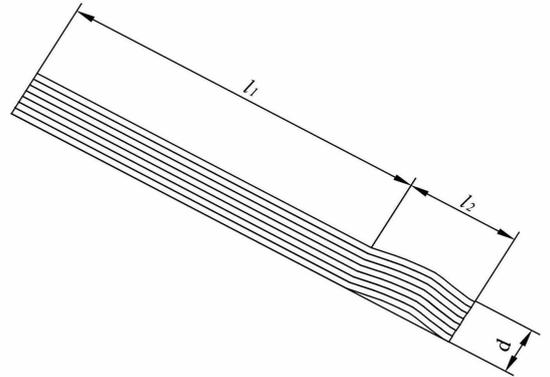


图4 顺层斜坡前缘岩体滑移-弯曲力学分析模型图

对于受后缘岩体下滑力作用而发生弯曲的前缘岩体,建立了如图5所示的力学模型。假设后缘岩体的剩余下滑力为  $F$ ,各个岩层面上的力为  $F_i$ ,为便于表达,将支座的影响系数记为  $\alpha$ 。

若岩体完整,即不存在结构面时发生弯曲的临界应力为:

$$F = \frac{\pi^2 EI}{\alpha l^2} = \frac{\pi^2 E}{\alpha l^2} \cdot \frac{1}{12} d^3 \quad (6)$$

对于具有同样总厚度、但由  $n$  层等厚岩体组成的层状岩体而言,每层岩体弯曲时的临界应力应有:

$$F_i = \frac{\pi^2 E I_i}{\alpha l^2} = \frac{\pi^2 E}{\alpha l^2} \cdot \frac{1}{12} \left(\frac{d}{n}\right)^3 \quad (7)$$

而弯曲时岩体的变形量  $\varepsilon$  与每层岩体的变形量是相同的,设岩体受到的剩余下滑力为  $F_m$ ,故:

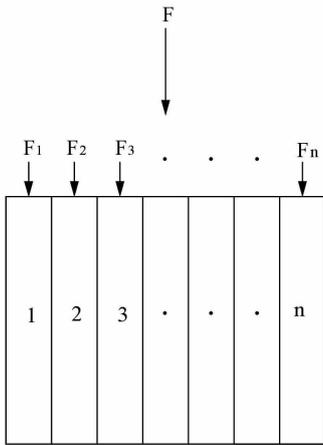


图5 层状岩体弹性模量

$$\varepsilon = \frac{F_m}{Ed} = \frac{nF_i}{Ed} \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$F_i = \frac{1}{n} F_m \quad (9)$$

代入式(7):

$$F_m = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{\pi^2 E}{\alpha l^2} \cdot \frac{1}{12} d^3 \quad (10)$$

对比式(6)与(10)可以看出,当弯曲岩体为等厚层状岩体时,其转动惯量  $I$  的折减系数为层数  $n$  的平方的倒数。

此外,欧拉公式只适用于弹性变形,然而,对于岩体而言,其单位面积上所受的下滑往往已经超过了岩体的比例极限而发生了弹塑性变形。针对该问题,工程中往往采用折减的弹性模量  $E_r$ ,其表达式为<sup>[7]</sup>:

$$E_r = \frac{4E_\sigma E}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_\sigma})^2} \quad (11)$$

式中  $E_\sigma$  为切线模量; $E$  为弹性模量,如图6。通

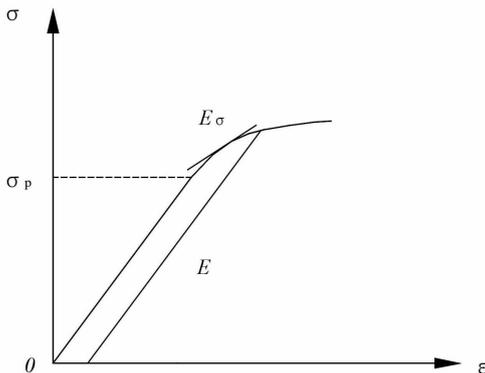


图6 切线模量和弹性模量

过采用折减弹性模量就可以继续采用欧拉公式的形式进行弯曲临界力的求解。

为简便,将折减弹性模量  $E_r$  简单表达为与弹性模量的关系并用折减系数表示,即:

$$E_r = \psi \cdot E \quad (12)$$

式中  $\psi$  为折减系数,一般采用经验值或根据岩体的弹塑性特性确定。

综上所述,层数为  $n$  的等厚层状岩体发生滑移-弯曲变形时应满足:

$$\gamma D l_1 \sin \alpha - (\gamma D l_1 \cos \alpha \tan \varphi + c l_1) \geq \frac{1}{n^2} \frac{\pi^2 E_r I}{n^2 (0.7l)^2} \quad (13)$$

若式(13)求得不合理,则表明在该坡长条件下斜坡不会发生弯曲,是稳定的;否则斜坡将发生弯曲。为了区别,将切层滑移的最大谷底有效岩体厚度记作  $d_{切}$ ,而将滑移弯曲求得的最大谷底有效厚度记作  $d_{弯}$ ,则发生滑移-弯曲的谷底有效岩体厚度应满足

$$d_{切} < d \leq d_{弯} \quad (15)$$

### 3 结 语

通过将顺层岩质斜坡的变形破坏模式细化为顺层滑移、切层滑移和滑移-弯曲三种类型,分别求其发生对应的定量临空条件后得到以下结论:

- (1) 顺层滑移时,河谷下切至切穿软弱结构面,河谷谷底的有效岩体厚度为0。
- (2) 切层滑移时,河谷谷底的有效岩体厚度应满足:  $d \leq d_{切}$ 。
- (3) 滑移-弯曲时,河谷谷底的有效岩体厚度应满足:  $d_{切} < d \leq d_{弯}$ 。

### 参考文献:

- [1] 黄洪波. 层状岩质边坡的稳定性分析[D]. 浙江大学硕士论文,2003.
- [2] 王 辉. 岩层厚度对顺层岩质边坡失稳机理的影响[D]. 贵州大学硕士论文,2009.
- [3] 陈自生. 浅论拱溃型顺层岩质滑坡[J]. 山地研究,1991,9(4):231-235.
- [4] 陈全明. 陡倾顺层岩质斜坡倾倒变形破坏机制的数值模拟研究[D]. 成都理工大学硕士论文,2011.
- [5] 蔡静森,晏鄂川,等. 反倾层状岩质边坡悬臂梁极限平衡模型研究[J]. 岩土力学,2014,35(S1):15-28.
- [6] 孙训方,等,主编. 材料力学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

### 作者简介:

张婷婷(1987-),女,河南洛阳人,博士后,研究方向:岩土体稳定性评价;  
周春清(1960-),男,山东费县人,高级工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)